基于超级电容储能的 HL-3 装置中性束逆变型高压电源模块设计

张锦涛 [1,2] 王英翘 [2] 汤贤 [1] 夏于洋 [2] 李青 [2]
1（南华大学核科学技术学院 衡阳 421001）
2（核工业西南物理研究院 成都 610225）

摘要 高压电源是中性束注入加热系统的重要组成部分，决定着束能量和引出束流的品质。随着电压等级的逐步提高，PSM 高压电源无法满足实验要求。为了实现中性束调制注入功率的快速切换，提出一种基于超级电容储能的逆变型高压电源。采用超级电容储能方式，降低所需电网容量，减小对电网的冲击。采用软开关技术的 DC-DC 谐振变换器结构，提高电源的响应速度，减小开关器件的开关损耗。设计电源模块电路拓扑，根据电源性能指标完成系统建模计算。建立充电电路和主回路 PSIM 仿真模型，对电源性能指标进行仿真验证。搭建逆变电源模块测试样机，完成相关性能指标测试。经仿真及实验验证，电源模块能够实现 1600V/50A 的稳定输出，满足 6MW/120kV 设计要求。

关键词 HL-3 装置；超级电容；中性束注入；逆变型高压电源；DC-DC 谐振变换器
中图分类号 TL62

Design of Inverter High Voltage Power Supply Module for HL-3 Device Neutral Beam Injection Based on Super capacitor Energy Storage

ZHANG Jintao[1,2] WANG Yingqiao[2] TANG Xian[1] XIA Yuyang[2] LI Qing[2]
1(*School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China*)
2(*Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China*)

Abstract **[Background]** The high voltage power supply is an important part of the neutral beam injection heating system, which determines the beam energy and the quality of the extraction beam current. With the gradual increase of voltage level, the PSM high voltage power supply cannot meet the experimental requirements. **[Purpose]** In order to realize the fast switching of injected power for neutral beam modulation, an inverter high voltage power supply based on super capacitor energy storage is proposed. **[Methods]** Super capacitor energy storage is adopted to reduce the required grid capacity and minimize the impact on the grid. The DC-DC resonant converter structure with soft-switching technology is used to improve the response speed of the power supply and reduce the switching loss of the switching devices. Design power module circuit topology, build system model and calculate relevant parameters based on power supply performance specifications. The charging circuit and main loop PSIM simulation model are established, and the power supply performance indexes are simulated and verified. Build the test prototype of inverter power supply module and complete the test of relevant performance indexes. **[Results and Conclusions]** After simulation and experimental verification, the power module is able to achieve a stable output of 1600V/50A, which meets the design requirements of 6MW/120kV.

Key words HL-3 device, Super capacitor, Neutral beam injection, Inverter high-voltage power supply, DC-DC resonant converter

---

四川省教育厅科技计划资助项目(MZGC20230009)；西物创新行动项目(202201XWCX002)
第一作者：张锦涛，男，1996 年出生，2021 年于南华大学获硕士学位，研究领域为电力电力，核能科学与工程
通讯作者：汤贤，E-mail:xiantang@usc.edu.cn；王英翘，E-mail:wangyq@swip.ac.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

中性束注入(Neutral Beam Injection，NBI)加热是托卡马克装置最有效的方法之一，国际上主要的大中型托卡马克装置都投入了中性束注入加热方式，配备了完备的中性束注入加热系统[1,2]。目前，托卡马克装置辅助加热系统高压电源拓扑结构主要有脉冲阶梯调制（pulse step modulation，PSM）高压电源以及逆变型高压电源两种。PSM 电源主要用于 100kV 以下的高压输出[3]；逆变型高压电源能够满足几百千伏及以上的电力需求[4]。国内外大型托卡马克装置 JT-60U、ITER、DEMO、CRAFT 中性束高压电源均采用逆变型高压电源技术的方案[5-7]。

中国环流三号（HL-3）装置已建成 5MW 中性束加热束线，高压电源系统采用 PSM 高压电源技术，额定输出参数：额定电压 80kV、额定电流 50A、脉宽 5s[8]。PSM 高压电源具有电路结构简单，控制方式灵活等优点，但是，随着中性束束能量的逐步提高，对高压电源的电压等级要求也提高，PSM 高压电源无法满足其需求。为了研究等离子体动量输运机理，要求高压电源调制输出，匹配负载等离子体参数达到最佳导流系数，实现 NBI 调制注入[9]。调制输出要求电源具有较大的du/dt，实现调制注入中高压的快速切换。为降低电网容量和减小对电网的冲击，提高高压电源的稳定性及响应性能，本文设计基于超级电容的高频逆变型高压电源系统。

1 超级电容器

双电层电容器（electric double-layer capacitors,EDLCs）是一种超级电容器，其工作原理主要基于在电极和电解质接触界面处，通过物理吸附作用形成的电化学双电层[10]。当电极充电时，离子在电极表面累积，形成一个与电极表面相反电荷的薄层，而不涉及实际的电子转移或化学反应。这种物理过程可迅速逆转，从而实现快速充放电。双电层电容器具有功率密度高，循环寿命长，工作温度范围广，充放电速度快，等效串联内阻(ESR)小等优点[11]。中性束注入高压电源系统功率较大，一条中性束注入束线功率通常可达几兆瓦甚至十几兆瓦，且要求长脉冲运行，需要储能单元具有较大的功率密度和能量密度。脉冲电容器具有较高功率密度，但是能量密度太低；储能电池具有较高能量密度，但是功率密度太低；锂离子电容器具有锂离子充电电池负极和双电层电容器正极相结合的构造，具有较超级电容更高的能量密度，但等效串联内阻较大。因此，选择双电层超级电容器作为中性束高压电源系统的储能器件。

2 6MW 逆变型高压电源拓扑

2.1 逆变电源系统结构拓扑

6MW 逆变型高压电源系统额定输出参数为：额定电压 120kV、额定电流 50A。由大功率变压器、充电模块电路、超级电容、逆变模块电路几部分组成，逆变电源系统结构拓扑如图 1 所示。电源系统由 126 个逆变电源模块组成，包括 3 组超级电容模组，每组电容模组供电 42 个电源模块。126 个逆变电源模块通过移相串联的方式，可以有效减小输出电压纹波，实现 120kV/50A 的额定输出[12,13]。逆变电源系统具有多种运行模式，可以采用 AC 10kV 或 AC 6kV 电网经大功率变压器变换为 AC 650V 进行供电，实现脉宽 5s 的额定输出。为了方便中性束测试平台的锻炼实验，可以利用超级电容储能供电，通过市电 AC 380V 经充电电路为超级电容充电储能，升压变换实现脉宽 1s 的额定输出。采用超级电容储能供电可以降低所需电网容量，减小对电网的冲击。

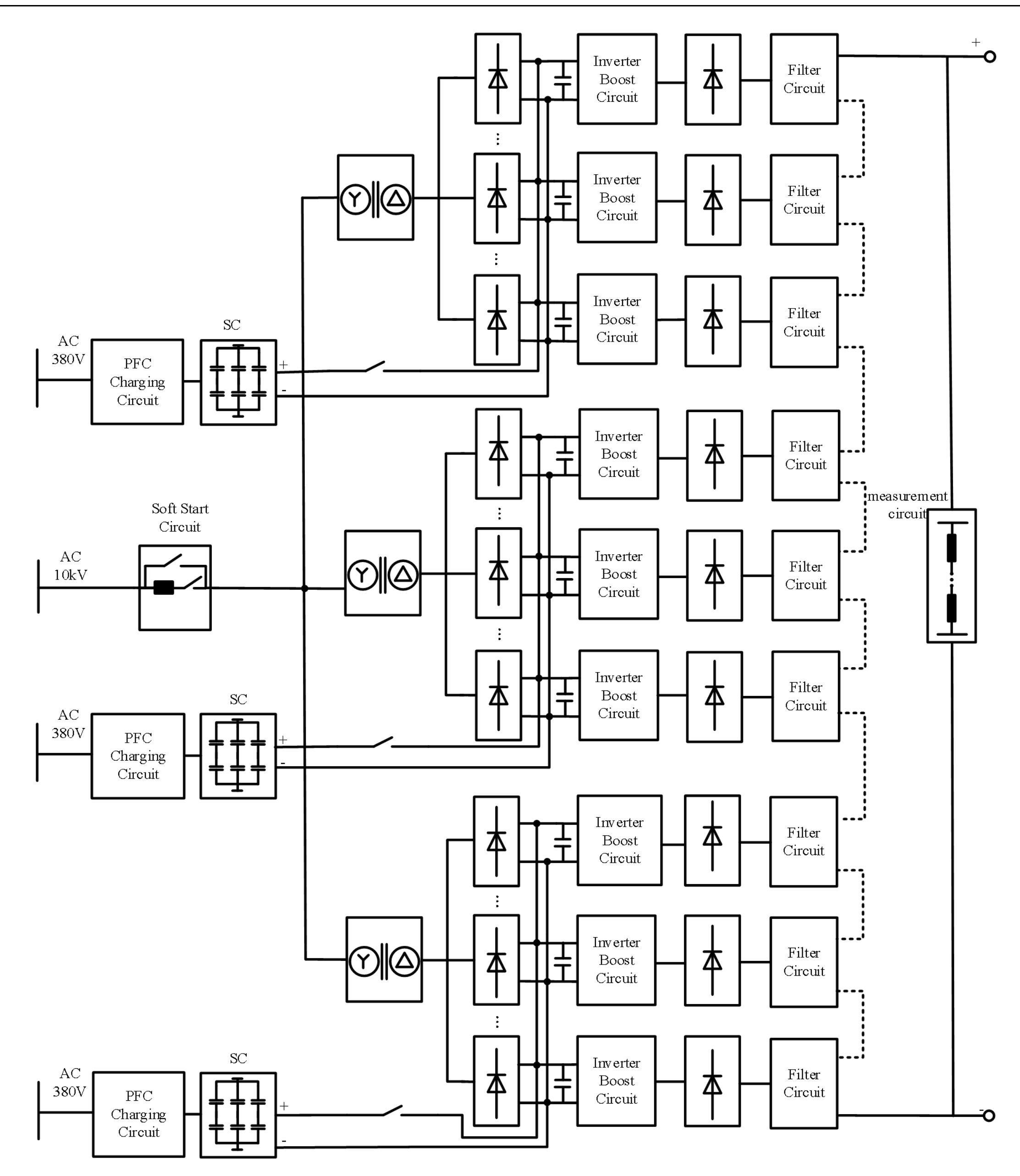


图 1　逆变电源系统结构拓扑

Fig.1　Inverter power system structure topology

2.2　逆变电源模块主回路拓扑

逆变电源模块主回路拓扑如图 2 所示，电源模块由超级电容充电电路、六脉波整流输入电路、逆变升压电路、输出整流电路和滤波电路几部分组成[14]。可以采用 AC 380V 直接供电，用于电源功能测试，额定输出参数：额定电压 1000V、额定电流 50A、脉宽 20ms；当满足 AC 10kV 或 AC 6kV 电网供电时，经大功率变压器变换为 AC 650V 供电，额定输出参数：额定电压 1600V、额定电流 50A、脉宽 5s；可以采用超级电容储能供电，利用 AC 380V 经充电电路为超级电容充电储能，然后经升压变换实现电压 1600V、电流 50A、脉宽 1s 的额定输出。逆变环节采用移相全桥逆变电路，逆变器工作频率为 6kHz。采用零电压软开关技术的移相控制方式，减小开关损耗和谐振损耗，提高系统动态响应速度[15]。输出整流电路采用二极管全波整流，经 T 型 LC 滤波电路进行滤波。各模块采用移相串联的方式，实现 120kV/50A 的额定输出，大大减小输出纹波。

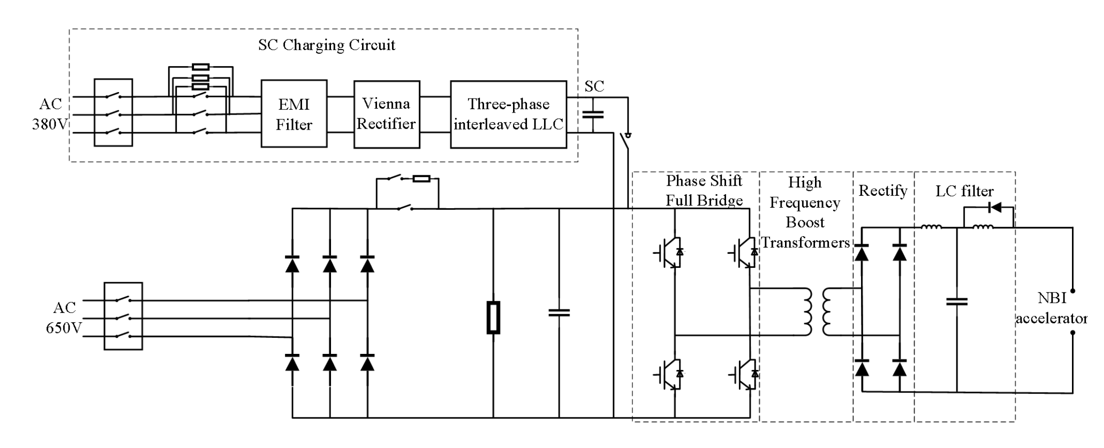


图 2 逆变电源主回路拓扑

Fig.2 Inverter power supply main circuit topology

2.3 超级电容充电电路拓扑

超级电容充电电路由软启动环节、EMI 滤波环节、PFC 变换器环节和 DC-DC 变换器环节组成，拓扑结构如图 3 所示。前级 PFC 变换器采用 Vienna 拓扑结构，通过增加无功电流控制环节，使得功率因素进一步提高，谐波得到抑制。可在较低空间尺寸要求下达到很好的功率因数，提高整个电源系统的稳定性和可靠性。后级 DC-DC 变换器采用交错移相的三相 LLC 拓扑结构，有效地减小电感饱和电流，总电感随交错的相数而减小[16]。三相 LLC 变换器由 4 部分组成：逆变开关、谐振腔、变压器和二极管整流。功率开关 MOS 管先将输入的直流电压转换为高频方波；随后进入谐振腔，消除方波的谐波并输出基频的正弦波；然后经高频变压器传输到变换器副边，并根据应用需求对电压进行升压或降压；最后，经二极管不控整流转换为稳定的直流输出。单级充电电路实现额定 500V 的充电电压等级，两级充电电路串联起来实现额定充电电压 1000V。

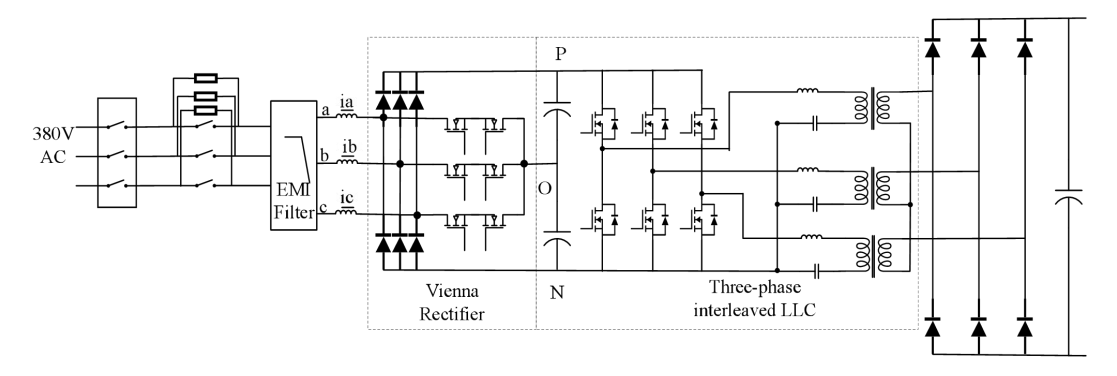


图 3 超级电容充电电路拓扑

Fig.3 Super capacitor charging circuit topology

3 参数设计

3.1 超级电容参数设计

根据超级电容供电模式下逆变电源模块参数：额定电压 1600V、额定电流 50A、脉宽 1s。因此，可以计算得到该逆变电源模块的额定输出功率为 80kW。充电时超级电容额定电压为 1000V，放电时最低电压不低于 800V。根据逆变电源模块的额定输出功率和超级电容放电时最低电压，可以确定单模块最大输出电流为 100A。逆变型高压电源系统每组超级电容模组供电 42 个模块，根据逆变电源参数，每组超级电容模组在T为 1s 的脉冲输出电流I为 4200A，则超级电容最小容量为：

$$C = \frac{Q}{\Delta U} = \frac{I \times t}{\Delta U} = \frac{(4200 \times 1)}{(1000 - 800)}\mathrm{F} = 21\mathrm{F} \tag{1}$$

因此，选择超级电容单个模组容量 6F，额定电压 160V，最大放电电流 220A，采用 34 个模块先并联，再 7 组串联，组合成超级电容柜。

超级电容容量：

$$C = C_m \times \frac{n_1}{n_2} = 6 \times \frac{34}{7}\mathrm{F} = 29\mathrm{F} \tag{2}$$

超级电容柜最大电压：

$$V_{max} = V \times n_2 = 160 \times 7\mathrm{V} = 1120\mathrm{V} \tag{3}$$

超级电容电压降：

$$\Delta U = \frac{Q}{C} = \frac{I \times t}{C} = \frac{4200 \times 1}{29}\mathrm{V} = 144\mathrm{V} \tag{4}$$

3.2 充电电路参数设计

超级电容充电电路主要由前级 PFC 整流电路和后级 DC-DC 变换电路组成，前级 PFC 电路采用 Vienna 电路拓扑，后级 DC-DC 采用三相 LLC 电路拓扑。根据超级电容参数，设计单级充电电路参数如表 1 所示。

表 1 超级电容单级充电电路参数

Table 1 Parameters of single-stage charging circuit for supercapacitor

技术参数 Technical Parameters	参数指标 Parameter indicators
输入电压 Input voltage（U_i）	380V-420V
输出电压 Input voltage（U_o）	500V
额定功率 Rating（P_o）	25kW
谐振频率 Resonant frequency（f_r）	50kHz
最大工作频率 Maximum operating frequency（f_s）	80kHz

建立三相 LLC 变换器等效电路图，三相 LLC 变换器可以看成三个单相 LLC 变换器组成，等效电路图如图 4 所示。

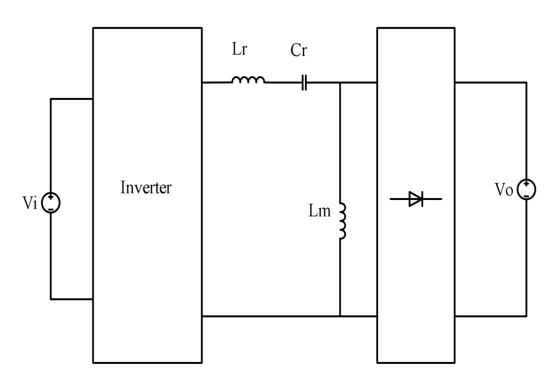


图 4 LLC 等效电路图

Fig.4 LLC equivalent circuit diagram

首先，确定变压器原边侧的等效负载阻抗：

$$R_{ac} = \frac{8n^2}{\pi^2} \cdot R_L \tag{5}$$

其中，R_L为输出电阻，根据$P = U^2/R$可得，$R_L = 10\Omega$，n为变压器变比$n = N_1/N_2$，取 0.8。所以可得$R_{ac} = 5.19\Omega$。

然后，确定静态增益M：

$$M = \frac{nU_o}{U_i} \tag{6}$$

其中，U_i在 380~420V 之间，U_o为 500V，根据谐振点的输入输出电压，变压器原副边变比n为 0.8。因此，可得最大静态增益$M_{max} = nU_o/U_{imin} = 1.053$，最小静态增益$M_{min} = nU_o/U_{imax} = 0.95$。

然后，确定工作在 ZVS 区域最大品质因数Q值：

$$Q_{max} = \frac{\lambda}{M_{max}}\sqrt{\frac{1}{\lambda} + \frac{{M_{max}}^2}{{M_{max}}^2 - 1}} \tag{7}$$

其中，λ为谐振电感L_r与L_m的比值，一般取 0.2，因此得到$Q_{max} = 0.74$。考虑一定裕量，Q值取Q_{max}的 90%：

$$Q = 0.9 * Q_{max} = 0.67 \tag{8}$$

谐振网络的品质因数为：

$$Q = \frac{Z}{R_{ac}} \tag{9}$$

其中，$Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$，为特性阻抗，所以可得：

$$\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = Q \times R_{ac} = 0.67 \times 5.19 = 3.46 \tag{10}$$

而串联谐振电路的谐振频率f_r为：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_r(L_r + L_m)}} \tag{11}$$

因此，可以计算得到谐振网络L_r、L_m和C_r的参数：

$$\begin{aligned} L_r &= 4.49\mu\text{H} \\ L_m &= 22.45\mu\text{H} \\ C_r &= 388\text{nF} \end{aligned} \tag{12}$$

4 仿真及测试

4.1 电路仿真

利用 PSIM 软件建立超级电容充电电路和移相全桥主回路的仿真模型。为了减少仿真计算量，超级电容充电电路中前级 Vienna 电路采用直流源代替，建立三相 LLC 电路的 PSIM 仿真模型，如图 5 所示。

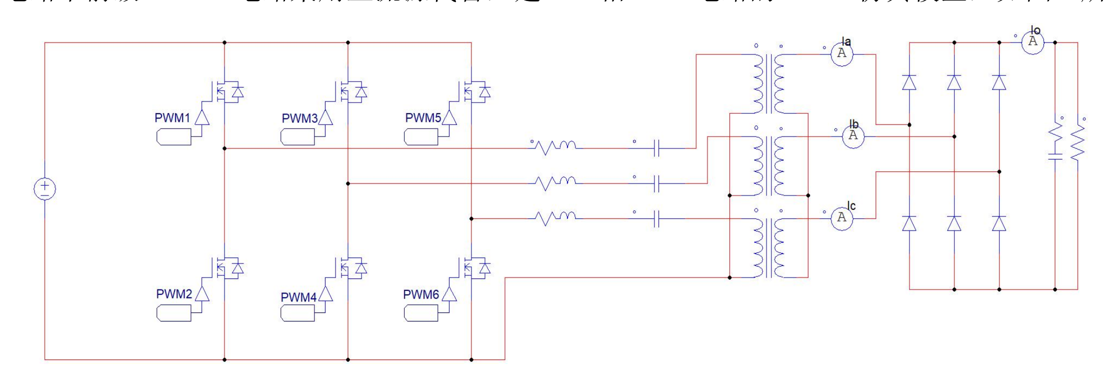


图 5 LLC 电路 PSIM 仿真模型

Fig.5 LLC circuit PSIM simulation model

将计算参数值代入仿真模型中，得到输出波形如图 6 所示。从图中可以看出，电路能够稳定输出 500V 电压等级，两级充电电路串联能够实现 1000V 电压等级输出，满足超级电容充电需求。

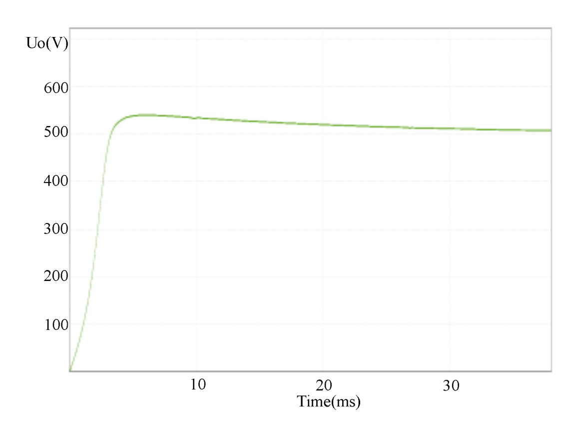


图 6　LLC 电路仿真输出

Fig.6　LLC circuit simulation output

建立逆变电源主回路 PSIM 仿真模型如图 7 所示。输入源采用超级电容，根据设计需求，一组超级电容容量为 29F，供电 42 组模块。因此，选择电容容量为 0.69F，初始电压 1000V，变压器变比为 n =21：63，开关频率为 6kHz。

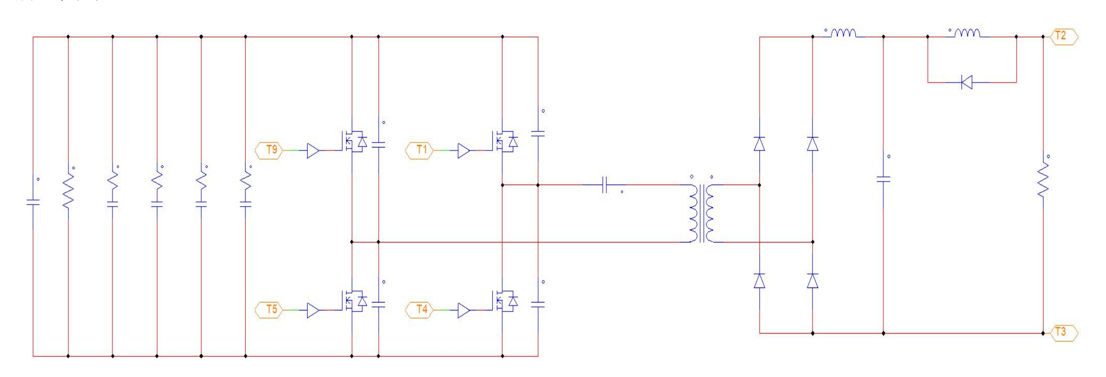


图 7　逆变电源 PSIM 仿真模型

Fig.7　PSIM simulation modeling of inverter power supplies

将相关设计参数代入仿真模型中，得到输出波形如图 8 所示。从图中可以看出，电路能够稳定输出 1600V 电压等级。但是，输出电压纹波较大，这是因为选择的滤波电容太小造成。因为中性束高压电源系统负载为离子源加速器，容易出现极间打火击穿现象，要求电源短路能量不能太高，因此选择的滤波电容不能太大。为了解决这一问题，电源模块采用移相串联的方式，可以有效地减小输出电压纹波。

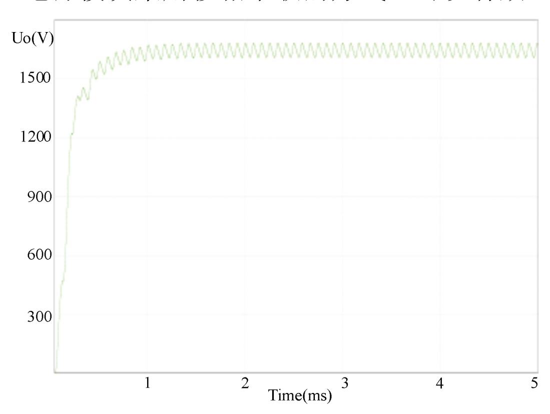


图 8　逆变电源仿真输出

Fig.8　Inverter power supply simulation output

4.2 实验测试

基于理论计算及仿真结果，搭建逆变电源模块测试样机，完成阶跃响应性能、电压纹波及软开关性能等相关性能指标测试。假负载采用玻璃釉无感电阻，阻值约为 30Ω，工作电压 1600V，脉宽 1s。电源模块阶跃响应性能测试如图 9 所示，上升时间大约为 2.3ms，能够实现电源模块功率的快速切换，满足中性束调制注入要求。



图 9 阶跃响应性能测试

Fig.9 Step response performance test

电源模块电压纹波测试如图 10 所示，测得纹波电压$U_r = 258/2\,\text{V} = 129\text{V}$。因此，可计算得到纹波系数为$Y = U_r/U_o = 129/1600 \times 100\% = 8\%$。该电源系统采用移相串联的方式实现 120kV 额定输出，可将输出电压纹波降低至 1%以下，满足系统要求。



图 10 电压纹波测试

Fig.10 Voltage ripple test

电源模块软开关性能测试如图 11 所示，蓝色代表 MOS 管开通信号，黄色代表 MOS 管两端电压信号，绿色代表变压器原边电流。从图中可以看出，当 MOS 管两端电压降到零后，MOS 管开通信号触发，实现 MOS 管零电压开通；并在 MOS 管两端电压上升之前，MOS 管关断信号触发，实现 MOS 管零电压关断，有效地降低了开关损耗。



图 11 软开关性能测试

Fig.11 Soft switch performance testing

5 结语

随着中性束注入系统对高压电源电压等级的逐步提高，PSM 高压电源方案无法满足要求。本文研究一种基于超级电容储能的逆变型高压电源技术，采用超级电容储能供电，降低所需电网容量，减小对电网的冲击。通过对电路系统进行建模计算，建立超级电容充电电路和电源模块主回路仿真模型。搭建逆变模块测试样机，测试电源模块的阶跃响应性能、电压纹波及软开关性能。经仿真和实验验证，采用高频逆变技术，有效提高电源的du/dt，高压电源的功率快速切换对实现中性束调制注入具有重要意义。

作者贡献说明：张锦涛：负责研究方案的仿真设计，实验样机的调试，论文的起草和最终版本的修订。汤贤：负责论文的整体设计，对文章进行批评性审阅及修订。王英翘：对研究方案的理论指导，对文章进行批评性审阅及修订。夏于洋：实验过程的调试方案讨论，实验数据的收集与分析。李青：实验调试方法的指导，实验过程的调试方案讨论。

参考文献

1 Kashiwagi M , Hiratsuka J , Ichikawa M ,et al.100s negative ion accelerations for the JT-60SA negative-ion-based neutral beam injector[J].Nuclear fusion, 2022(2):62. DOI:10.1088/1741-4326/ac388a.

2 Schunke,Boilson,Chareyre,et al.Overview of the negative ion based neutral beam injectors for ITER[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Ion Sources.2018.DOI:10.1063/1.5053337.

3 Zhou P H , Li Q , Mao X H ,et al.Simulation analysis and experiment of high frequency transformation of pulse step modulation high voltage power supply[J].Hejubian Yu Dengliziti Wuli/Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2019, 39(1):28-33.DOI:10.16568/j.0254-6086.201901005.

4 张明;周澜;王姝;马少翔;章雪亮;于克训;潘垣. 基于负离子的中性束注入器加速极逆变型高压电源控制策略[J]. 强激光与粒子束,2019,(04):71-77.DOI:10.11884/HPLPB201931.180265.

ZHANG Ming; ZHOU Lan; WANG Shu; MA Shaoxiang; ZHANG Xueliang; YU Kexun; PAN Yuan. Negative-ion-based control strategy for a neutral beam injector accelerating pole inverter-type high-voltage power supply[J]. Intense Laser and Particle Beam,2019,(04):71-77.DOI:10.11884/HPLPB201931.180265.

5 Ratti D , Ferro A , Santoro F ,et al.Application studies of the modular multilevel converter topology to the acceleration grid power supply of the DEMO neutral beam injector[J].Fusion Engineering and Design, 2021, 173:112907.DOI:10.1016/j.fusengdes.2021.112907.

6 Takahashi A , Tanaka T , Fujita H ,et al.Development of -1MV DC Filter and High-voltage DC Measurement Systems for ITER NBI[J].IEEJ Transactions on Power and Energy, 2018, 138(2):166-174.DOI:10.1541/ieejpes.138.166.

7 Hiratsuka J , Kashiwagi M , Ichikawa M ,et al.Achievement of high power and long pulse negative ion beam acceleration for JT-60SA NBI[J].Review of Scientific Instruments, 2020, 91(2):023506.DOI:10.1063/1.5131302.

8 曹建勇,魏会领,耿少飞. HL-2M 装置 NBI 研制组. HL-2M 装置 NBI 加热系统规划及束线研究进展[J]. 核聚变与等离子体

物理,2021,(S2):489-494.DOI:10.16568/j.0254-6086.2021s2011.

J.Y. Cao, H.L. Wei, S.F. Geng. HL-2M device NBI development group. Progress in the planning of NBI heating system and beamline study for HL-2M device[J]. Fusion and Plasma Physics,2021,(S2):489-494.

9 Zimmermann C F B , Mcdermott R M , Fable E ,et al.Analysis and modeling of momentum transport based on NBI modulation experiments at ASDEX Upgrade[J].2022.055020.DOI:10.1088/1361-6587/ac5ae8

10 Zhao T , Zhou S , Xu Z ,et al.Molecular insights into temperature oscillation of electric double-layer capacitors in charging–discharging cycles[J].Journal of Power Sources, 2023, 559:232596-.DOI:10.1016/j.jpowsour.2022.232596.

11 武伟,谢少军,张嬰,等.基于组合型双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计[J].中国电机工程学报, 2014, 34(27):8.DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2016.3.83.

WU Wei, XIE Shaojun, ZHANG Jiu, et al. Control strategy analysis and design of supercapacitor energy storage system based on combined bidirectional DC-DC converter[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34(27):8. DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2016.3.83.

12 Shengli,Junyu,Sun,et al.Dead-Time for Zero-Voltage-Switching in Battery Chargers with the Phase-Shifted Full-Bridge Topology: Comprehensive Theoretical Analysis and Experimental Verification[J].Journal of power electronics: A publications of the Korean Institute of Power Electronics, 2016, 16(2):425-435.10.6113/jpe.2016.16.2.425

13 Kavak H I , Candan M Y , Aydemir M .Experimental Verification of Output Inductor-less Phase-Shifted Full-Bridge Converter for Capacitor Charger Application[J].gazi university journal of science, 2020, 7:59-68.DOI:10.1109/gpecom52585.2021.9587487

14 zhang zhuo X,Jian P .Review of Research on Phase-shifted Full-bridge ZVS DC-DC Converter[J].Journal of Power Supply, 2022, 20(4):11-27.DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2022.4.11.

15 冯学玲;杜志强;田茂飞;王学华. 移相全桥 DC/DC 变换器实验装置的研制[J]. 电力电子技术,2023,(07):1-4.doi:10.3969/j.issn.1000-100X.2023.07.001.

FENG Xueling;DU Zhiqiang;TIAN Maofei;WANG Xuehua. Development of experimental device for phase-shifted full-bridge DC/DC converter[J]. Power Electronics Technology,2023,(07):1-4.doi:10.3969/j.issn.1000-100X.2023.07.001.

16 Lu J , Khaligh A .1kW, 400V/12V high step-down DC/DC converter: Comparison between phase-shifted full-bridge and LLC resonant converters[J].IEEE, 2017:275-280.DOI:10.1109/ITEC.2017.7993284